

中性子・ガンマ線を同時利用した産業用密度計の研究

白川 芳幸* 杉本 英彦* 富永 洋**

A Study on Industrial Density Gauge Based on Simultaneous Usage of Neutrons and Gamma-rays

Yoshiyuki SHIRAKAWA, Hidehiko SUGIMOTO and Hiroshi TOMINAGA

(Received Aug. 29, 1997)

This paper describes the possibility of an industrial density gauge to meet the requirement for more precise and stable blast furnace operation. A basic concept of the gauge is to measure some quantities with the simultaneous use of multi-radiations of neutrons and gamma-rays, and to obtain multi-types of information on material flow and gas flow concerned with the conditions inside the blast furnace.

Laboratory experiments using a prototype gauge showed that the gauge could measure the quantities to be essential to estimate the blast furnace conditions. In practice, it distinguished between iron ore and coke layers, and at the same time measured bulk density of iron contained in iron ore by counting thermal neutron capture gamma-rays from iron. It also gave the information on material bulk density by detecting Compton scattered gamma-rays from material, i. e. iron ore and coke.

Key Words : Density Gauge, Neutron, Gamma-ray, Blast Furnace

1. 緒 言

放射線を利用した工業用計測機器は、鉄鋼、紙・パルプ、化学分野などを中心に積極的に導入され、その数は8931台¹⁾に達している。これらの機器の利用方法は、厚さ計、水分計、密度計などのように単一の放射線（中性子、 γ 線、 β 線）を用いて単一の量（厚さ、レベル、密度、水分）を測定するものがほとんどである。放射線利用機器は高度成長期に導入されたものが多く、昨今は更新時期を向かえている。この機会に現在以上に高精度で高度な機能を有する装置の開発、放射線

* 電子工学科

** 放射線計測協会

装置の新しい利用分野の探索などがおこなわれている。本論文では上述の環境変化の認識の上で、より高度な放射線応用計測を目指して、複数の放射線を同時利用し、複数の関連する量を同時に把握する複合計測について論じる。本研究では具体的対象として鉄鋼業における溶鉱炉（以下高炉）の内部状態を代表する諸量の計測（コークス・鉱石識別、鉱石鉄分かさ密度、原料かさ密度）を選定し、中性子・ γ 線の同時利用による放射線応用計測の可能性を理論とモデル実験によって検証する。

2. 高炉の概要と計測の重要性

高炉は内容積 5000m^3 の高温・高圧の反応容器で、上部よりコークス、鉱石が交互に層状に装入され、下部から 1200°C の熱風が送風される。熱風によりコークスが燃焼し、高温の CO ガスが発生する。このガスによって鉱石の酸素が奪い取られ、すなわち還元され、同時に熔融した鉄鉄となる。鉄鉄は高炉下部から定期的に抽出され、つぎの工程に輸送される。これが高炉の一連のサイクルである²⁾。このサイクルを安定に進めるためにはガスが均一に上昇し、コークス・鉱石の層が一定速度で順次降下し、融着帯で所定の還元が進行し、品質・量が計算どおりの鉄鉄となることが必要である。この実現のためには高炉内物流の代表であるガスの流れ、原料の流れの把握が重要である³⁾。これら諸量は高炉に設置された 1000 点を越えるセンサー（温度計、圧力計、ガス分析計など）の情報から間接的に推定されている。また人工知能システムにより大局的な高炉内状態診断は可能となってきている⁴⁾。しかしながらより緻密な操業・制御のために必要量を直接的に計測することは常なる課題として現在にいたっている。ここで本研究で対象とする計測量と、それによって獲得される情報の関係を Table 1 に整理する。

Table 1 Relation between measurement and information to be obtained.

State or quantity to be measured	Information to be obtained
Distinction between coke and iron ore	Material flow
Iron bulk density	Iron distribution
	Reduction condition
Material bulk density	Compaction condition
	Gas flow

3. 中性子・ γ 線による複合計測原理

中性子・ γ 線による計測原理導出の準備として放射線の工業利用を振り返り、つぎに高炉内の計測に適した放射線および期待される反応を検討し、複合計測の方法を提案する。

3. 1 放射線の工業計測利用

工業利用に限定して放射線の種類と反応、および利用例を Table 2 に整理する。この表から主た

るの利用は、単一の放射線による単一の量の測定であることがわかる。

しかし、複合計測へと発展させる場合においても利用可能な反応は表に示した通りであるので、組み合わせの巧みさによって新しい計測量が導けるかどうかが鍵となる。

Table 2 Industrial applications of ionizing radiation.

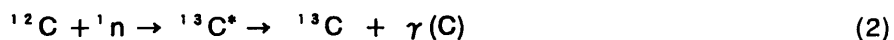
Radiation	Reaction	Application
α -ray	Absorption	Smoke detector
β -ray	Absorption	Dust monitor
	Scattering	Paper, film thickness gauge
γ -ray	Compton scattering	Steel thickness gauge
		Density gauge
		Level gauge
Neutron	Elastic scattering	Moisture gauge
	Inelastic scattering	Multi-element analyzer
	Thermal neutron capture	Multi-element analyzer

3. 2 計測原理

高炉の原料の状態を把握するには原料に放射線を照射し、原料と放射線の相互作用で発生する新たな放射線を検出する必要がある。高炉の原料であるコークスのかさ密度は 0.5g/cm^3 程度、鉱石は $1.5\sim 2.5\text{g/cm}^3$ 程度である。さらに放射線を放出する放射性同位元素（以下線源）と検出器は実際の高炉では高温・高圧から保護するために水冷構造のプロープに入れられる。したがって放射線にはプロープを貫通し、原料のある部分まで透過できるような性質が求められる。この観点から個体中では $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ のオーダーで吸収される α 線、 β 線⁵⁾ は使用できない。X 線は実用的なエネルギー領域といわれる $50 \sim 150\text{keV}$ では $5\sim 10\text{cm}$ の透過力が期待できるが、線源から原料、そして検出器までの距離を考えると十分な透過力とはいえない。数ある放射線の中で十分な透過力を有する候補は中性子と γ 線に絞られる。透過力の観点から高炉の原料相当では $50\sim 100\text{cm}$ の透過が可能である⁶⁾。

3. 2. 1 中性子反応を利用した計測原理

コークスと鉱石が熱中性子 (0.025eV) と反応する様子を(1), (2)式に示す⁷⁾。ここでは鉱石の主成分を Fe (鉄分)、コークスの主成分を C (炭素分) とする。



線源から放出された中性子は一般に 1MeV 以上の高速であるが、水素原子が十分に存在する中では水素原子核と弾性散乱を起こし、 $10\sim 20$ 回の衝突後には反応性に富む熱中性子となる。この熱中性子は Fe や C の原子核に捕獲される。すると捕獲した原子核は励起状態になり 10^{-14}s 後に γ 線を放出し自らは安定な原子核に戻る。この熱中性子捕獲反応の確率と放出される γ 線のエネルギーを Table 3 に示す。

Table 3 Characteristics of thermal neutron capture reactions with iron and carbon.

Element	Cross section (σ :barn)	Atomic mass (A)	γ -ray energy (MeV)	Emission intensity (P:%/capture)	Sensitivity (P σ /A)
Fe	2.55E+00	55.8	7.645	24.13	1.103
			7.631	28.51	1.303
			6.018	9.00	0.411
			5.920	9.02	0.412
C	3.40E-03	12.0	4.945	67.64	0.019

Table 3 の感度 $P \rho/A$ は 100 個の熱中性子が照射されたときに 1 質量単位当たりから発生する γ 線の個数を表している。Fe と C を比較すると Fe は 54 倍感度が高い。したがって捕獲 γ 線の有無でも計測プローブの周囲に存在する物質がコークスが鉱石かを識別できる。さらに γ 線のエネルギー弁別を 5 MeV 以上でおこなうと鉱石の Fe が存在するときのみ γ 線が検出される。この場合には識別の確度は理論上は 100% である。

つぎに鉄分のかさ密度を求める方法を提案する。鉄分が存在しない場合 (0g/cm^3) には捕獲 γ 線の量はゼロである。純鉄の場合 (7.86g/cm^3) には最大の一定量となる。捕獲 γ 線の量を N_{Fe} 、鉄分のかさ密度を ρ_{Fe} とすると、

$$N_{\text{Fe}} = A(1 - e^{-\alpha \rho_{\text{Fe}}}) \quad (3)$$

と表現できる。ここで A および α は実験的に決まる正の定数である。実際の高炉内の鉱石のかさ密度は $1.5 \sim 2.5\text{g/cm}^3$ であり、鉄分のかさ密度はさらに小さく $1.0 \sim 2.0\text{g/cm}^3$ となる。そこで(3)式を線形化し計測プローブによるバックグラウンド分を考慮すると、

$$N_{\text{Fe}} = A \alpha \rho_{\text{Fe}} + B \quad (4)$$

が得られる。ここで B は実験的に求める正の定数でバックグラウンド分である。この(4)式によって捕獲 γ 線を計数すれば鉄分密度が逆算される。

以上述べたように中性子と原料の反応を利用した計測方法によりコークス・鉱石の識別、鉄分かさ密度の把握が可能である。

3. 2. 2 γ 線反応を利用した計測原理

γ 線と物質との主要な相互作用は光電効果、コンプトン散乱、電子対生成である⁸⁾。この中でコンプトン散乱は $100\text{keV} \sim 1\text{MeV}$ の γ 線で主要な相互作用である。しかも散乱 γ 線の発生確率が原子番号に比例するという扱い易い性質も兼ね備えている。

そこでコンプトン散乱を利用したかさ密度測定を考える。ここでコンプトン散乱の確率 P_c 、測定対象の密度 ρ 、測定対象を構成する i 番目の元素の重量割合を W_i 、原子番号、原子量をそれぞれ Z_i 、 A_i とすると、

$$P_c = k \rho \sum W_i (Z_i/A_i) \quad (5)$$

となる⁸⁾。kは正の定数である。コークス、鉬石の主要元素の Z_i/A_i はほぼ0.5で一定している⁹⁾。したがって(5)式の $\sum W_i (Z_i/A_i)$ は0.5となる。このことから P_c は密度 ρ に比例する。この性質はコンプトン散乱で発生する γ 線の量が密度の関数になることを示唆するものである。実際の測定対象は大きさがあるので入射 γ 線、散乱 γ 線とも測定対象内で減衰する。この効果も含めて線源と検出器が測定対象の両側にある透過方式の場合、密度 ρ と測定対象を透過した γ 線の関係は、

$$N = N_0 B \exp(-\mu_m \rho t) \quad (6)$$

となることが知られている。ここでN、 N_0 は透過 γ 線、入射 γ 線の数である。Bはビルドアップ係数、 μ_m は測定対象の質量減衰係数、tは測定対象の厚さである。密度 ρ 以外の条件を一定にすると、Nを測定することによって密度 ρ が求められる。しかしながら高炉の内部に透過型の幾何学的条件を成立させることは難しい。

そこで線源と検出器が測定対象と同じ側、すなわち散乱方式の場合の密度測定をモデル化する。透過方式は散乱されずに透過してきた γ 線を扱うのでモデル式が単純であるためいち早く密度計として実用化されている。一方、散乱方式では散乱された γ 線と密度を対応づけるのが容易ではない。したがって実際の装置を測定現場に持ち込み、あらかじめ密度が既知な試料で校正および検量線を作成してから使用するのが一般的である。散乱方式の密度測定のモデリングが土木分野への適用を目指して大野らによって提案されている⁸⁾。このモデルは地面のように線源と検出器が平面の測定対象に向かいあう場合を想定しているが、高炉の内部のように計測プローブの周囲全体が測定対象に充填されている場合には新たなモデルが必要である。そこで筆者らが提案した測定対象の形状に限定されないモデルを応用すると、

$$N = A(1 - \exp(-\alpha \rho)) \exp(-\beta \rho) \quad (7)$$

が得られる¹⁰⁾。ここでA、 α 、 β は正の定数である。密度がゼロのとき(7)式のNはゼロとなる。密度 ρ の増加とともにNも増加し、 ρ が $\ln(1 + \alpha/\beta) / \alpha$ で最大値となり、その後は ρ の増加にしたがいゼロに漸近する。さらに(7)式の特徴を述べると、 $\alpha \rightarrow \infty$ のとき、

$$N = A \exp(-\beta \rho) \quad (8)$$

となることである。これは透過方式の(6)式と同じである。さらに実用的な範囲で(7)式を近似すると、

$$N = A(-\alpha \beta \rho^2 + \alpha \rho) \quad (9)$$

が得られる。実際の高炉原料を用いた予備実験で $\alpha \gg \beta$ 、かつ $\beta \approx 0$ であったので(9)式はさらに簡単化でき、

$$N = A \alpha \rho + C \quad (10)$$

となる。ここでCは正の定数でバックグラウンド分である。(10)式で散乱 γ 線の個数を測定すれば密度を求めることができる。実際の高炉内のコークス、鉬石は充填状態となっているので実際に得られるのはかさ密度 ρ である。

以上、計測原理で述べてきたことをTable 4に整理する。

Table 4 Measurement on the basis of neutron and γ -ray reactions.

Measurement	Neutron	γ -ray
Distinction between iron ore and coke layers	●	
Iron bulk density	●	
Material bulk density		●

3. 複合計測プローブの設計

複合計測プローブはFig.1に示すように線源部、遮蔽部、検出部、ケーシング、そして制御部より構成される。それぞれについて要点を述べる。

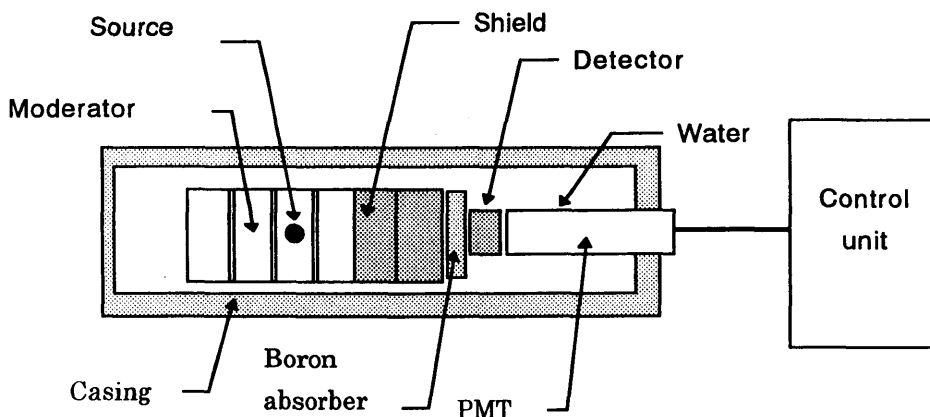


Fig.1 Cross section of a prototype sensor probe.

3. 1 線源部の設計

線源に求められる条件は中性子と γ 線を放出すること、そしてエネルギーが適切であることである。代表的な2種類の線源の比較をTable 5に示す¹¹⁾。表中の ^{252}Cf から放出される中性子のエネルギー分布のピークは1.0MeVにあり、その平均エネルギーは約2.0MeVである。一方、代表的な中性子線源である $^{241}\text{Am-Be}$ のピークは約3.0MeV、平均は4.5MeVである。水素原子核との弾性散乱によって熱中性子化される指標である水の質量減衰係数を両者の中性子の平均エネルギーで比べると、前者は3、後者は2である。すなわち ^{252}Cf の中性子の方が熱中性子に成りやすい。つぎに同時に放出される γ 線のエネルギーをみると ^{252}Cf はコンプトン散乱が優勢な領域であり透過力も充分といえる。ところが $^{241}\text{Am-Be}$ の γ 線エネルギーは60keVと弱くプローブを貫通し高炉内に到達することさえ難しい。後者を線源とすると別の γ 線用の線源が必要となる。以上を総

合して ^{252}Cf を線源とする。

線源部にはさらに一層効率的に中性子を熱中性子化する減速材が必要である。この減速材として形状の加工が容易な高密度のポリエチレンを使用する。

Table 5 Comparison between ^{252}Cf and $^{241}\text{Am-Be}$.

	^{252}Cf	$^{241}\text{Am-Be}$
Decay type	α -decay 96.9% SF 3.1%	$^{241}\text{Am} \rightarrow ^{237}\text{Np} + \alpha$ $^9\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{12}\text{C} + n$
Half life	2.65 year	433 year
Mean energy	Neutron 2MeV γ -ray 1MeV	Neutron 4.5MeV γ -ray 60keV
Emission rate	Neutron 0.12/s/Bq γ -ray 0.66/s/Bq	Neutron 0.6×10^{-4} /s/Bq γ -ray 0.36/s/Bq

3. 2 遮蔽部の設計

これは検出器に線源から直接的に入射する γ 線を減らすためのものであり線源と検出器の間に挿入される。密度が大きく加工が容易な材料が好まれ、本プローブの場合も最も良く使用されている鉛を採用する。

3. 3 検出部の設計

検出器の重要な仕様として検出効率とエネルギー分解能があげられる。エネルギー分解能は成分分析においては最重要な要素である。今回の計測では γ 線のエネルギーはFeからの捕獲 γ 線の6~8MeVと計測対象物からの散乱 γ 線の2MeV以下である。両エネルギー帯には大きなエネルギー差があるので両者を分離して計数するための検出器分解能は問題にならない。したがってこの計測においては特に高エネルギー6~8MeVの領域における検出効率の良さが重視される。検出効率シミュレーションおよび文献¹²⁻¹³⁾によれば直径50mm x 長さ50mmの検出器と比較すると、最も使用されているNaI(Tl)検出器に対しBGO検出器($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)は約2~3倍の検出効率を示す。この理由は主要成分であるビスマスの原子番号が83と大きく、密度も 7.13g/cm^3 と高いため γ 線が検出器内部で止められる確率が高いことによる。ただしエネルギー分解能はNaI(Tl)検出器に比べて2倍以上悪いが、前述の理由により採用の妨げにならない。本装置でBGO検出器を用いる。

検出器の周囲に熱中性子が存在すると検出器の金属から捕獲 γ 線が発生しノイズとなるので検出器を熱中性子を吸収しかつ高エネルギー γ 線を放出しないポロンシートで覆うなどの工夫も施した。

3. 4 ケーシングおよび制御部の設計

ケーシングは線源部、遮蔽部および検出部を保護するものである。実用化を念頭に高温に耐えれ

るように内部に冷却水を流す構造とする。また原料との接触による磨耗を考慮し、5mmの厚さのステンレスで製作する。

制御部にはBGO検出器に1000~2000Vの直流高圧を供給する高圧電源、信号のエネルギー弁別をおこなうシングルチャンネルアナライザー(SCA)， γ 線個数の計数器であるスケーラ，波形の形を調べるマルチチャンネルアナライザー(MCA)などを実装する。

4. 複合計測プローブの試作と実験

前章で述べた設計仕様にもとづいて複合計測プローブを試作し，実験室内で特性テストを実施した。以下に試作機の主たる仕様をまとめ，実験方法および結果を示すことにする。

4. 1 複合計測プローブの試作

主たる仕様を箇条書きで示す。

(1) 線源部

- ・線源 : ^{252}Cf 3.7MBq(100 μCi) 減速材中心に埋め込み
- ・減速材 : 高密度ポリエチレンおよび冷却水，長径 80mm x 短径 60mm x 厚さ 20mm の楕円 形状の減速材を 9 枚設置

(2) 遮蔽部

- ・遮蔽材 : 長径 80mm x 短径 60mm x 厚さ 50mm の楕円形状鉛を 3 枚設置

(3) 検出部

- ・検出器 : 直径 50mm x 長さ 50mm のBGOシンチレータ，および光電子増倍管
- ・吸収材 : ボロン入り高密度ポリエチレン

(4) ケーシング

- ・形状 : 高さ 190mm x 幅 105mm x 長さ 530mm で厚さ 5mm のステンレス鋼板

(5) 制御部

- ・電源 : 0~2000V 直流高圧電源 2 台
- ・SCA : 2 台 (計数用) 2 台 (ゲイン制御用)
- ・スケーラ : 2 台
- ・MCA : 1 台 (SCA の範囲調整用)

4. 2 複合計測プローブによる実験

試作したプローブを用いて導出した計測原理の確認，計測性能の評価をおこなう。

4. 2. 1 実験準備

実際のコークス，鉍石を使用して実験試料をつくる。試料リストを Table 6 に示す。コークスは 35~50mm の径を用意した。これは高炉に装入されるコークスと完全に同一である。鉍石は原料かさ密度と鉍石かさ密度を変化させる必要があるので高炉に装入される 15~20 mm の鉍石をベースに一部還元されている鉍石，ほぼ還元されているペレット，5mm 以下の鉍石粉をブレンドした。

上記の試料を縦 600mm x 横 600mm x 高さ 470mm の容器に充填し，中央部にプローブのケーシングが入る空洞を設けた。容器はコークス用 1 個，鉍石用 5 個である。

Table 6 Material samples used for experiments (unit: g/cm³).

Sample ID		Iron bulk density	Material bulk density
Coke	A	---	0.53
Iron ore	B	1.08	1.88
Iron ore	C	1.10	1.79
Iron ore	D	1.29	1.95
Iron ore	E	1.46	1.99
Iron ore	F	1.44	2.52

4. 2. 2 実験項目

計測原理と計測性能の確認のために以下の項目をテストする。

a) コークス・鉱石の識別

まずコークス・鉱石の識別のために検出された γ 線のエネルギー弁別をおこないある閾値範囲のエネルギーを有する γ 線を計数する。事前の実験結果より6.5~8.5MeVを閾値の範囲とした。この計数値が充分大きい場合には計測プローブ周辺には鉱石が存在する。逆の場合にはコークスが存在するとする。この結果によりコークス・鉱石を識別する。

b) 鉄分かさ密度の測定

上述の6.5~8.5MeVの範囲の計数値を各試料に対して求める。鉄分かさ密度の検量線, (4) 式を作成し, 相関係数, 測定誤差を評価する。

c) 原料のかさ密度の測定

事前の実験により種々の元素からの捕獲 γ 線に対して散乱 γ 線が圧倒的に多いエネルギー領域を探索した結果, すなわち成分の影響を受けず, かさ密度にのみ応答するエネルギー領域を調べたところ1.0~1.5MeVが適切であることが判明した。この閾値範囲の γ 線を計数した結果と試料のかさ密度の検量線, (10)式を作る。そして相関係数を求め, 誤差を評価する。

以上の実験を実施した。各試料 A~F の順で300s づつ4回計数し, その平均値を求めた。

4. 2. 3 実験結果および評価

a) 実験結果

実験で得られたデータをグラフ化した。高密度ポリエチレン100mm, 遮蔽の鉛50mmの場合の鉄分かさ密度と捕獲 γ 線の関係を示したものがFig. 3である。原料かさ密度と散乱 γ 線の関係を表したものがFig. 4である。計数値, 計算によるかさ密度をTable 7に示す。

Fig.3 の関係を線形の検量線で表現すると,

$$N_{Fe} = 2732 \rho_{Fe} + 2404, \quad R = 99.9\% \quad (11)$$

となる, 相関係数Rは99.9%である。同様に Fig.4 の関係は(12)式となる。

$$N = 2005 \rho + 11310, \quad R = 99.8\% \quad (12)$$

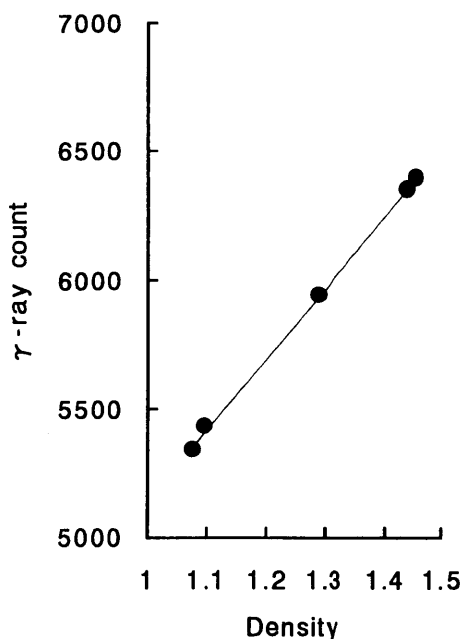


Fig.2 Relation between iron bulk density (g/cm^3) and γ -ray count (/300 s).

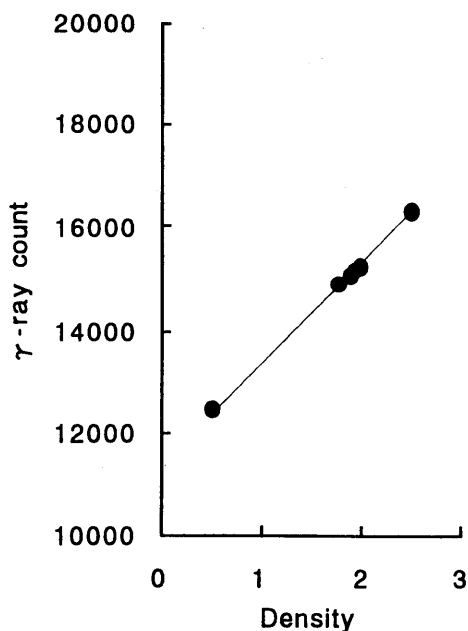


Fig.3 Relation between material bulk density (g/cm^3) and γ -ray count (/300 s).

Table 7 Comparison between true values and those measured..
(density: g/cm^3)

Iron bulk density		Material bulk density	
True	Measured	True	Measured
---	---	0.530	0.550
1.078	1.073	1.790	1.797
1.096	1.106	1.880	1.881
1.290	1.291	1.950	1.935
1.445	1.440	1.990	1.975
1.464	1.459	2.520	2.518

b) 性能評価

まずコークス・鉍石の識別について述べる。本来(11)式は鉄分がゼロの場合にはゼロ、すなわち原点を通る直線である。それに対して実際は2404となった。これはケーシング、検出器のホルダー、内部の部品などに鉄分が存在し捕獲 γ 線を発生したためである。コークスの試料に対しては計数は3373であった。最も鉄分が少ない試料Bの場合の捕獲 γ 線は5336であり、両者の計数差は統計変動（計数値の平方根）の27倍あり、コークス・鉍石は完全に識別できる。

つぎに鉄分かさ密度の測定について考える。検量線は(11)式で与えられ、相関係数は99.9%ときわめて高い。これは計測原理の線形式(4)の妥当性を表している。誤差についてみると事前に測定されている値（真値）と検量線(11)から計算された値の差は絶対値で 0.005 g/cm^3 未満、相対誤差で0.5%未満である。実用上も充分な精度といえる。

同様に原料のかさ密度の測定について述べる。検量線(12)式で、その相関係数は99.8%である。散乱 γ 線による密度計測原理の線形式(10)の実験による確認ができた。誤差については絶対値で 0.015 g/cm^3 未満、相対誤差でコークスの場合には3%、鉱石の場合には0.8%未満である。検量線が鉱石のかさ密度領域で良く一致し、コークスのかさ密度領域で誤差が増すのは密度範囲が広いために下に凸の非線形性が現れたためである。

5. 結 言

本論文では放射線応用計測の主流であった単一の放射線から単一の情報を得る立場を見直し、複数の放射線を同時利用して複数の情報を同時に得る複合計測^{1,4)}の可能性について原理と実験の両側面から考察した。

計測対象のモデルとして未だに間接計測に依存する高炉を選定した。放射線として中性子と γ 線を用い、中性子の減速によって可能となる熱中性子捕獲反応、 γ 線のコンプトン散乱反応を計測原理導出の中心に据えた。原理を具現化した計測プローブによる実験で中性子反応によりコークスと鉱石の識別、鉱石のかさ密度測定が可能になったことが明らかになった。そして γ 線反応により原料かさ密度が求められることが示された。このように2つの放射線を利用して3つの情報を求めることが実験室系では可能となった。

実際の高炉で状態計測を実施するには計測プローブの耐熱・耐圧などの安全設計が大きな課題となる。高炉の直接計測のきっかけ、そして放射線応用計測の新たな分野の展開の一助となるよう研究を進めたい。

謝辞

本論文は、新日本製鉄君津製鉄所と日本原子力研究所との協力により、主として後者のアイソトープ事業部（当時）利用開発室（大洗）の施設において実施した基礎的実験によって得られたデータを基に再検討をおこない、密度計の理論モデルを新たに提案したものである。当時、研究実験の準備、および技術的検討、討論に参加していただいた多くの関係者の方々に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 科学技術庁原子力安全局編：“放射線利用統計1996”，pp.20-22，日本アイソトープ協会，東京（1996）
- 2) 鉄鋼新聞社編：“改訂鉄鋼実務用語辞典”，pp.324-325，鉄鋼新聞社，東京（1983）
- 3) 日本鉄鋼協会編：“鉄鋼製造法第1分冊”，pp.379-387，丸善，

東京 (1978)

- 4) 天野繁：製鉄プロセスにおけるコンピュータ利用技術，西山記念技術講座，pp.186-197，日本鉄鋼協会 (1993)
- 5) G.F.Knoll：“Radiation Detection and Measurement”，pp.45-47，John Wiley & Sons，New York (1979)
- 6) 日本アイソトープ協会編：“改訂3版アイソトープ便覧”，pp.821-822，丸善，東京 (1984)
- 7) M.R.Wormald and C.G.Clayton：In-Situ Analysis of Coal by Measurement of Neutron-Induced Prompt γ -Rays, Nuclear Geophysics, pp.71-82, Pergamon Press. Oxford (1983)
- 8) 大野博教：密度計，Radioisotopes, 22, 5, pp. 59-66 (1973)
- 9) 村上悠紀夫編：“放射線データブック”，pp.28-61，地人書館，東京 (1982)
- 10) 白川芳幸，他：線源・検出器間2重距離方式による γ 線散乱密度計，計測自動制御学会論文集, 29, 5, pp.504-511 (1993)
- 11) S.Cierjacks et al：“Neutron Sources For Basic Physics and Applications”，pp.7-18, Pergamon Press, Oxford (1983)
- 12) Brouchure on Bismuth Germanate Detector, Harshw (1986)
- 13) A.E.Evans Jr.：Gamma-ray Response of a 38mm Bismuth Germanate Scintillator, IEEE Trans.Nucl.Sc., 27,1, pp.172-175 (1980)
- 14) 山崎弘郎，石川正俊編：センサーフュージョン，pp.13-15，コロナ社 (1992)